

## ●特集・不活性ガスをめぐって

## 飽和潜水における不活性ガス

池田知純\*

キーワード：飽和潜水，不活性ガス，水素，窒素，減圧

## Some aspects of inert gas in saturation diving

Tomosumi Ikeda\*

Division of Environmental Medicine, National Defense Medical College Research Institute

## Keywords:

saturation diving  
inert gas, hydrogen  
nitrogen  
decompression

## はじめに

より長く潜ろうとする飽和潜水においては、潜水深度や潜水目的等に応じて各種のガスが用いられるが、そこでは生理的不活性ガス（以下不活性ガスという）がガスの大部分を占め、不活性ガスの性状が潜水を大きく左右する。そこで、本稿では飽和潜水の様々な側面に及ぼす不活性ガスの働きについて概説する。なお、いずれの不活性ガスも酸素なしではその中で生存できないので、実際の環境ガスは例えばヘリウム酸素と言うべきであるが、便宜上酸素という語は省略する。表1に各種ガスの性状一覧を示しておく<sup>1)</sup>。

## 1. 熱損失

飽和潜水においてダイバーの体から失われる熱量はダイバーの体を取りまくガスの主に熱伝導度（率）によって左右される。即ち、ヘリウムの熱

伝導度は窒素のそれに比して約6倍であるので、体がヘリウムで囲まれていると皮膚からの熱が周囲に伝わり失われやすい。実際にヘリウムの中に立つと衣服の間をガスがすーすーと通り抜けていくような感じを自覚する。この熱損失は環境圧力にも大きく影響され、例えば深度300m相当圧の中での快適温度は29~31℃となり、高温域でかつ許容幅が小さくなる<sup>2)</sup>。したがって、もしダイバーが搭乗しているカプセルが水中でエネルギーの供給を絶たれた場合、熱損失を最小限に抑えることが炭酸ガスの制御と相俟って緊急の課題となる。

熱の損失は呼吸を介しても生じるが、若干誤解されている面がある<sup>3)</sup>。すなわち、呼吸による熱損失は体内に吸入された冷たい呼吸ガスが肺で加温されて排出することによって生じるので、熱損失はガス密度と比熱の積に比例することになり、熱伝導による影響は少ない。また、ヘリウムの比熱はたしかに窒素より大きいものこれは重量当たりの値であるので、密度と比熱の積では窒素の方が大きくなり、熱損失の実際の測定でも窒素を呼吸した方が大きくなっている<sup>4)</sup>。

## 2. 呼吸

呼吸抵抗はガスの通路に当たる管の条件が同じであれば、主としてガスの密度及び粘度（粘性）に左右されるが、実際の潜水においては粘度による影響はほとんど無視してよい。潜水において重要な指標となる最大努力換気量 MVV の変化を見ると、MVV は呼吸ガスの密度  $\rho$  の  $-k$  乗、すなわち  $\rho^{-k}$  に比例して表され、実測では  $k$  は 0.3 から 0.4 になる<sup>5)</sup>。つまり、密度が増加するにつれて MVV が減少するわけで、これは取りも直さず潜水深度が深くなり呼吸ガスが圧縮され密度が増え

\*防衛医科大学校防衛医学研究センター異常環境衛生研究部門

表1 各種ガスの性状〔文献1〕による

分子	密度	粘性	溶解度(38℃)		拡散度(37℃)		熱伝導度	定圧比熱
			水中	オリーブ油	水中	オリーブ油		
空気	—	1.14	183	—	—	—	6.4	0.24
酸素	32	1.26	202	0.095	—	28	6.6	0.22
窒素	28	1.10	175	0.013	0.061	30	7.0	0.25
ヘリウム	4	0.16	194	0.009	0.015	63	18.6	36.9
水素	2	0.08	88	0.017	—	113	26.3	45.9

密度(37℃) : g/L  
粘性(20℃) : μpoise  
溶解度 : ml(STPD)/ml/ata  
拡散度 : cm<sup>2</sup>/s×10<sup>-6</sup>  
伝導度 : cal/s·cm·°C×10<sup>-5</sup>  
比熱 : cal/g/°C

るに従って呼吸の制約が大きくなることを意味する。

同じことを呼吸のフローボリューム曲線から見ると、図1のようになる。この図は質量の小さいヘリウム環境下で測定された値を元にして描かれたものだが<sup>6)</sup>、軽いヘリウムを呼吸していても潜水深度が増すに従って呼気吸気の流速が減少し、ついには最大に努力しても大気圧中で通常の呼吸しているときの流速に近づいていくのがわかる。もしヘリウムの7倍の質量を有する窒素を呼吸していれば、はるかに浅い深度で限界に達してしまう。

### 3. 麻酔作用

ガスの麻酔作用の詳細は現在でもよく解明されていないが、少なくともガスの脂肪への溶解度と密接に関連していることが判っている。ただし、ヘリウムに関してはその麻酔作用は溶解度から類推される強さよりもはるかに小さい。アルゴンやネオンの溶解度は高く当然麻酔作用は強いものと思われるが、実際の潜水において問題となるのは窒素である(後述するように、特殊な潜水では水素の麻酔作用も無視できなくなる)。

空気環境下では深度30m前後から窒素麻酔(窒素酔い)の影響が現れ、40mあたりから愉快になり、70~80mになると笑いが止まらなく緻密な思考が出来なくなるので、深い潜水では窒素に比べて麻酔作用の格段に弱いヘリウムが使われる。

なお、近年窒素による麻酔作用を軽減するとともに減圧速度を高めることを目的として、窒素酸素ヘリウムのいわゆる三種混合ガス(トライミッ

クス)が使われるようになってきている<sup>7)</sup>。

不活性ガスによる麻酔作用は環境の圧力が増すことによって軽減することが知られており、pressure reversalとも言われる<sup>8)</sup>。その有力な機序として臨界容積仮説というのがあるが、それは窒素が溶け込み膨張した細胞が圧力によって小さくなったために麻酔作用が軽減するというものである。

これをいわば裏面からサポートする極めて興味深い現象がある。それは、潜水深度が大きい飽和潜水で認められる高圧神経症候群である。加圧速度にもよるが深度およそ200m前後から吐き気やめまい、食欲不振、手指のふるえ等を示す症候群で、そこでBennettらは環境ガス中に窒素を5~10%加えると症状が軽快することを見出した<sup>9)</sup>。このときの窒素分圧は窒素酔いを起こす圧力をはるかに越えており、Bennettらは症状の軽減を圧力によって圧縮された神経細胞に窒素が溶け込み細胞が膨張してもとの容積に近くなったためであると推測している。これは取りも直さず麻酔作用におけるpressure reversalの鏡面として捉えることができるが、実証されているわけではない。

### 4. 減 圧

減圧方法は不活性ガスのいわゆる半減時間(半飽和時間ともいう)や各深度の許容過飽和分圧等によって大きく左右されるが、そもそも減圧に直接関わる不活性ガスの排出理論そのものもいまだに明確にはされていないのが現状である。そのような状態であるので、飽和潜水減圧表の作成は本

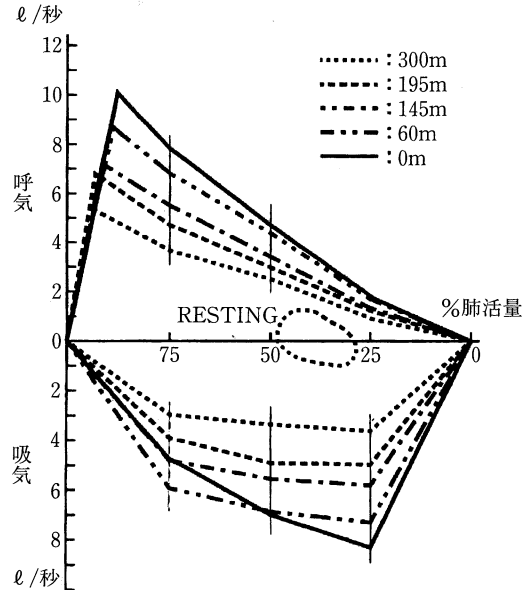


図1 潜水深度によるフローボリューム曲線の変化  
〔文献6〕より転載（提供：橋本昭夫）

質的に試行錯誤の連続であったといっても過言ではない。海上自衛隊で採用した英国海軍の飽和潜水減圧表などはその典型といってもよく、その詳細は別稿を参照されたい<sup>10)11)</sup>。また、Linは深度300mからの減圧で概略同じような結果をもたらした各国の減圧表を比較検討し、その減圧時間が実に4日から12日間までにもわたるものであったことを示している<sup>12)</sup>。

しかしながら、数量的捉え方もないわけではなく、その中でもっとも基本的な論文はSchreinerらによるものであるが<sup>13)</sup>、そこでは減圧速度は $(PO_2 + \Delta P) \times \ln 2 \times 60 / T_{1/2}$ で表される( $PO_2$ : 環境ガス中の酸素分圧,  $\Delta P$ : 許容過飽和分圧,  $T_{1/2}$ : 半減時間)。つまり不活性ガスに関して言えば、その半減時間と許容分圧が減圧に大きく関与するわけで、米海軍の飽和潜水減圧表も浅いところでは許容過飽和分圧を小さくしてゆっくり浮上するように作成されている。とは言っても、その減圧スケジュールに設定されている昼間2時間と夜間6時間の1日あたり計8時間に及ぶ減圧停止時間は減圧計算から導き出されたものではなく、やはり試行錯誤的な要素はぬぐいきれない<sup>14)</sup>。

Schreinerらによる前述の式では減圧速度は半

減時間の長短により大きく左右されることになり、半減時間の長い窒素を用いた飽和潜水ではヘリウムの場合よりも減圧に時間をかけていることが多い。現にEckenhoffらによれば、窒素環境下でヘリウム用の減圧表の減圧速度に従って減圧したところ高率に減圧症の発症をみている<sup>15)</sup>。

ところで、非常に混乱することだが、気泡の形成しやすさについては全く逆のことが言われている。つまり、ヘリウムを用いた方がより小さい過飽和圧力で気泡が形成されるというのである<sup>16)</sup>。ヘリウムを用いた潜水では第一減圧点を空気潜水に比べてより深い深度に設ける必要があることが以前より指摘されており、実際の減圧表もそのようにされている。このことを野寺誠らは超音波Bモード法によって確実に気泡を検知しながら検討している<sup>17)</sup>。それによると、ヘリウム潜水の方がより小さい過飽和圧力によって気泡が出現しており、かつ気泡は現れやすく消失しやすいことが確認されている。そして、ヘリウムの方が窒素に比べて溶解度が低く拡散速度が大きいことがこれらの原因ではないかとしている。

また、不活性ガスのこのような特性をいかして、呼吸ガスの構成を変えることによって効率的な潜

水が試みられることがあったが<sup>18)~20)</sup>、中でも減圧途中にヘリウムから窒素に変換して減圧時間を短くする方法はいわゆるガススイッチ法としてバウンス潜水等でルーチン化されているところもある。他方、先に記したように呼吸ガスとしてヘリウムと酸素と窒素を混合したいわゆる三種混合ガス(トライミックス)を用いる場合もある。この方法は梨本一郎らによって精力的に追求され、潜函工事では実用化されるまでに至っている<sup>7)</sup>。但し、このようにガスの構成が複雑になった場合のガスの動態についてはいまなお明らかではない。

## 5. 水 素

水素についても触れておかなねばならない。よく間違われることだが、水素も窒素と同じように生理的不活性ガスなのである<sup>21)22)</sup>。たしかに、高圧になれば生体の中で反応することもあるが、通常は分子としての水素は生体内で不活性であり、水素を呼吸したとしても血中PHが上昇することはない。水素といえば酸素と反応して爆発するのではないかと危惧されようが、酸素濃度がおよそ3%以下であれば水素は燃えることはないとされているので<sup>23)</sup>、爆発の可能性はガスの安全管理がなされている限り極めて小さい。

水素が飽和潜水で使用される意義はその質量の小ささにある。呼吸抵抗は呼吸ガスの密度に相関するので、深深度の飽和潜水では質量がヘリウムの半分である水素を用いる意義は充分あるのである。但し、実際には水素の麻酔作用が強いため、水素とヘリウムの混合ガスとして用いられることが多いようだ。なお、水素の麻酔作用が強いことから類推されるように、水素には高圧神経症候群を軽減する作用もあるといわれている<sup>24)</sup>。

水素を用いた潜水の歴史は意外に古く、第二次大戦中にスウェーデン海軍によって実施されているが、最初の110m実海面潜水を成功裡に終えた後、160m潜水において水素とは関係のない事故によって実験の主唱者であるArne Zetterströmが死亡し、かつ事後調査中に爆発事故が発生したために、中断されてきた<sup>25)</sup>。しかし、近年フランスCOMEX社のHYDRA計画等によって再び取り上げられ、水素を用いた深度700mを超える飽和潜水が実施されている。

最後に、水素をめぐる一風変わった話題を記し

ておこう。さきに水素は不活性ガスであると記したが、米海軍ではこの程、水素と炭酸ガスをメタンと水に変換する微生物をラットの腸内に注入することによって、生体内の水素分圧を速やかに下げることができる可能性を見出した<sup>26)</sup>。この原理を用いれば、減圧症の発症を予防しかつ減圧時間を著明に短縮することも不可能ではなくなる。

## 〔参 考 文 献〕

- 1) Flynn ET, Catron PW, Bayne CG: Lesson 2; Physical properties of diving gases. In: Diving Medical Officer Student Guide. Washington DC MD: Naval Technical Training Command, 1981
- 2) Flynn ET, Vorosmarti J Jr, Modell HI: Temperature Requirements for the Maintenance of Thermal Balance in High Pressure Helium-Oxygen Environments. Research Report 21-73. Washington DC: U. S. Navy Experimental Diving Unit, Washington Navy Yard, 1974
- 3) Kuehm LA: Invited review: Thermal effects of the hyperbaric environment. In: Bachrach AJ & Matzen MM, eds. Underwater Physiology VIII. Bethesda MD: Undersea Medical Society. 1984; 413-39
- 4) Schmidt TC: The advantages of helium-oxygen breathing gas for cold water diving in the air depth range. Undersea Biomed Res 9(suppl): 15, 1982
- 5) Lanphier EH & Camporesi EM: Pulmonary function. In: Bennett PB & Elliott DH, eds. The Physiology and Medicine of Diving, 4th ed. London: W. B. Saunders. 1993; 77-130
- 6) 池田知純: 潜水医学入門—安全に潜るために. 東京: 大修館書店, 1995
- 7) 梨本一郎: 3種混合ガス(トライミックス)による潜水技術とその土木分野への応用. 土木学会誌. 81: 18-21, 1996
- 8) Miller KW: Hydrogen as an anesthetic gas: Approaches to predicting suitable hydrogen-helium mixtures for deep diving. In: Brauer RW, ed. Hydrogen as a Diving Gas. Bethesda MD: Undersea Hyperbaric Medical Society. 1987; 39-51
- 9) Bennett PB, Blenkarn GD, Roby J, Youngblood D: Suppression of the high pressure nervous syndrome in human dives by He-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. Undersea Biomed Res 1: 221-237, 1974
- 10) 池田知純: 英国海軍飽和潜水減圧表の発展と展望. 防衛衛生. 35: 501-520, 1988
- 11) 池田知純: 本邦最初の実海面300m飽和潜水計画

- における減圧及び減圧症. 防衛衛生. 38 : 219-229, 1991
- 12) Lin YC: Formulation of saturation dive decompression tables based on critical pressure and experimental gas elimination. In: Lin YC & Niu AKC, eds. *Hyperbaric Medicine and Physiology*. San Pedro CA: Best Publishing Co. 1988; 99-119
  - 13) Schreiner HR & Kelly PL: Computation methods for decompression from deep dives. In: Lambertsen CJ, ed. *Underwater Physiology Proceedings of the Third Symposium on Underwater Physiology*. Baltimore: The Williams & Wilkins Co. 1967; 275-299
  - 14) Workman RD: Decompression theory: American practice. In: Bennett PB & Elliott DH, eds. *The Physiology and Medicine of Diving and Compressed Air Work*, 2nd ed. London: Baillière Tindall. 1975; 305-330
  - 15) Eckenhoff RG & Vann RD: Air and nitrox saturation decompression: A report of 4 schedules and 77 subjects. *Undersea Biomed Res.* 12: 41-52, 1985
  - 16) Workman RD: Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. Research Report 6-65. Washington DC, U.S. Navy Experimental Diving Unit, Washington Navy Yard. 1965
  - 17) 野寺 誠, 宮崎正己, 後藤與四之, 梨本一郎: 減圧症の実験的研究—ヘリウム酸素混合ガス潜水と空気潜水の比較—. *日本高気圧環境医学会雑誌*. 27: 129-135, 1992
  - 18) Keller H & Bühlmann AA: Deep diving and short decompression by breathing mixed gases. *J Appl Physiol* 20: 1267-70, 1965
  - 19) Hamilton RW Jr(ed): *Development of Decompression Procedures for Depths in Excess of 400 Feet*. Bethesda MD; Undersea Medical Society, 1975
  - 20) Bühlmann AA: *Decompression - Decompression Sickness*. Berlin: Springer-Verlag, 1984
  - 21) Fife WP: The toxic effects of hydrogen-oxygen breathing mixtures. In: Brauer RW, ed. *Hydrogen as a Diving Gas*. Bethesda MD: Undersea Hyperbaric Medical Society. 1987; 13-23
  - 22) Kayar SR, Axley MJ, Homer LD, Harabin AL: Hydrogen gas is not oxidized by mammalian tissues under hyperbaric conditions. *Undersea Hyperbaric Med* 21: 265-275, 1994
  - 23) Zalosh RG: Hydrogen flammability and ignitability in deep diving atmospheres. In: Brauer RW, ed. *Hydrogen as a Diving Gas*. Bethesda MD: Undersea Hyperbaric Medical Society. 1987; 213-225
  - 24) Brauer RW & Dutcher JA: Interaction of hydrogen with the high pressure neurologic syndrome. In: Brauer RW, ed. *Hydrogen as a Diving Gas*. Bethesda MD: Undersea Hyperbaric Medical Society. 1987; 81-97
  - 25) Linden A & Muren A: Arne Zetterström and the First Hydrox Dives. Stockholm: Swedish National Defence Research Institute. 1985
  - 26) Kayar SR: Biochemical decompression: A fundamentally new approach. *Pressure* 26(2): 1-2, 1997